

PENGKINIAN ANALISIS PERHITUNGAN BALIK PEDOMAN DESAIN PELAPISAN ULANG

Bagus Hario Setiadji

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik
Universitas Diponegoro
Jln. Prof. Soedarto, SH., Semarang 50275
Tlp. 024-7474770, Fax. 024-7460060
bhsetiadji@undip.ac.id

Supriyono

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik
Universitas Diponegoro
Jln. Prof. Soedarto, SH., Semarang 50275
Tlp. 024-7474770, Fax. 024-7460060
supriyono.ir@gmail.com

Eko Yuli Priyono

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik
Universitas Diponegoro
Jln. Prof. Soedarto, SH., Semarang 50275
Tlp. 024-7474770, Fax. 024-7460060
ekoypefp@gmail.com

Galih Widyarini

Program Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik
Universitas Diponegoro
Jln. Hayam Wuruk 5-7, Semarang
Tlp. 024-8311802
galihwidyarini@gmail.com

Abstract

In Directorate General of Highways' overlay design guide Pd T-1-2002-B, one kind of evaluation conducted on existing pavement structure is an evaluation on subgrade condition using back calculation procedure to determine the resilient modulus of the subgrade. To date, the design guide recommends to use adjustment factor C of no more than 0.33 on the modulus obtained from back calculation procedure to produce design modulus. However, a proper description on why the factor is required is not available. In this research, an evaluation of the factor was proposed. As a comparison to the back calculation procedure in the guide, another back calculation method based on best fit trial and error was considered. The results showed that the guide could not perform well in predicting the design elastic modulus, as indicated by factor, i.e. the ratio between design/measured and calculated moduli, was two times higher than the value expected. Therefore, this research suggested to replace back calculation procedure in the guide with the new ones which has proved capable of producing accurate results, such as best fit trial and error or closed-form back calculation methods. By using this new back calculation procedure, the adjustment factor C in the guide is not necessary anymore.

Keywords: pavement, overlay, backcalculation, elastic modulus, adjustment factor

Abstrak

Salah satu bentuk evaluasi terhadap struktur perkerasan eksisting menurut Pedoman Desain Pelapisan Ulang Pd T-1-2002-B, Ditjen Bina Marga, adalah evaluasi kondisi tanah dasar menggunakan analisis perhitungan balik, yang hasilnya dinyatakan dalam parameter modulus resilien. Selama ini Pedoman Desain Pd T-1-2002-B selalu menganjurkan untuk memberikan faktor koreksi C sebesar maksimum 0,33 terhadap nilai modulus yang dihasilkan dari hasil perhitungan balik bila nilai modulus ini akan digunakan untuk keperluan desain tanpa ada penjelasan untuk apa faktor koreksi ini digunakan. Pada penelitian ini evaluasi terhadap nilai faktor koreksi dilakukan. Suatu program perhitungan balik yang didasarkan pada konsep *best fit trial and error* diusulkan untuk digunakan sebagai pembandingan terhadap metode perhitungan balik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas hasil perhitungan balik ternyata tidak mampu memprediksi secara akurat nilai elastisitas untuk kebutuhan desain. Rasio kedua nilai modulus itu ternyata dua kali lebih besar dibandingkan dengan koefisien yang disyaratkan sebagai faktor koreksi. Oleh karena itu, direkomendasikan untuk tidak menggunakan metode perhitungan balik dalam desain dan mengganti dengan metode perhitungan balik *best fit trial and error*. Penggunaan metode perhitungan balik *best fit trial and error* juga memberikan arti bahwa faktor koreksi C di dalam Pedoman Desain tidak diperlukan lagi.

Kata-kata kunci: perkerasan, pelapisan ulang, perhitungan balik, modulus elastisitas, faktor koreksi

PENDAHULUAN

Suatu konstruksi jalan yang telah melayani beban lalu lintas akan mengalami penurunan kondisi sebagai akibat dari akumulasi pengaruh lalu lintas dan lingkungan. Penurunan kondisi tersebut perlu dikembalikan ke kondisi semula melalui kegiatan penanganan jalan berupa kegiatan rehabilitasi jalan. Rehabilitasi perlu dirancang dengan baik dengan menggunakan prosedur perancangan yang berlaku, seperti Pedoman Desain *overlay* Pd T-01-2002-B (yang selanjutnya disebut Pedoman Desain), Direktorat Jenderal Bina Marga (2002), yang mengadopsi metode pelapisan ulang American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) tahun 1993.

Pedoman Desain Bina Marga (2002) ini mempunyai kelebihan, yaitu memberikan keleluasaan kepada pengguna dalam melakukan desain dan mempunyai tingkat fleksibilitasnya yang tinggi. Tetapi metode ini mempunyai kelemahan yang mendasar, yang salah satunya adalah pada saat melakukan evaluasi kondisi tanah dasar eksisting untuk keperluan penentuan desain tebal lapisan *overlay*. Darter, et al. (1992) merekomendasikan bahwa nilai modulus resilien tanah dasar hasil perhitungan balik dari data lendutan harus dikalikan dengan suatu faktor koreksi (C) maksimum sebesar 0,33 apabila nilai modulus resilien ini akan digunakan untuk keperluan desain. AASHTO (1993) menyebutkan bahwa penggunaan faktor koreksi ini terbatas hanya pada tanah kohesif saja. Adanya faktor koreksi ini menimbulkan pertanyaan, yaitu apakah nilai modulus elastisitas E_2 hitung yang dihasilkan oleh prosedur perhitungan balik dalam Pedoman Desain perlu direduksi sedemikian rupa sehingga besarnya nilai modulus tersebut untuk keperluan desain hanya maksimum sebesar 0,33 dari nilai modulus awal.

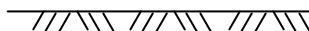
Pada penelitian ini diusulkan untuk menggunakan alternatif program perhitungan balik, yaitu program perhitungan balik berdasarkan konsep *best fit trial and error*. Dalam hal ini dipilih program EVERCALC yang dikembangkan oleh Washington State Department of Transportation. Program ini dipilih karena dua faktor utama, yaitu kemudahan dalam penggunaan dan waktu analisis yang relatif cepat. Tujuan studi ini adalah melakukan telaah terhadap representasi yang dilakukan oleh program EVERCALC terhadap kondisi metode perhitungan balik dalam Pedoman Desain, melakukan analisis sensitivitas terhadap program EVERCALC, serta melakukan pengkinian Pedoman Desain.

METODE PENELITIAN

Kegiatan penelitian ini terdiri atas empat bagian besar. Keempat bagian tersebut adalah: (i) melakukan *setting* program *backcalculation* EVERCALC untuk perkerasan lentur dua lapisan dengan beban merata; (ii) melakukan analisis sensitivitas terhadap program perhitungan balik yang telah dipersiapkan dan prosedur perhitungan balik dalam Pedoman Desain; (iii) proses validasi program perhitungan balik yang telah dipersiapkan

dan prosedur perhitungan balik dalam Pedoman Desain dengan menggunakan data riil, dan (iv) pengkinian prosedur perhitungan balik dalam Pedoman Desain.

Tahap pertama dalam penelitian ini adalah melakukan *setting* program *backcalculation* EVERCALC untuk menjadikan program tersebut dapat melakukan proses perhitungan balik pada struktur perkerasan lentur yang terdiri atas 2 lapisan. Proses *setting* pertama adalah dengan melakukan analogi struktur perkerasan n lapisan menjadi struktur perkerasan dua lapisan, yaitu lapisan komposit (dengan modulus E_p , rasio Poisson μ_p , dan tebal D), dan *subgrade*, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

	Usulan Penelitian ini		Kondisi riil
Lapisan komposit	E_p, μ_p, D	Lapisan 1	E_1, μ_1, h_1
		Lapisan 2	E_2, μ_2, h_2
		Lapisan 3	E_3, μ_3, h_3
			
Subgrade	E_s, μ_s	Subgrade	E_s, μ_s

Gambar 1 Analogi Struktur Perkerasan yang Digunakan pada Penelitian Ini

Program EVERCALC merupakan program perhitungan balik dengan proses iterasi. Salah satu kunci keberhasilan dari metode perhitungan balik ini adalah ketepatan dalam memilih nilai modulus elastisitas awal yang digunakan untuk memulai perhitungan. Oleh karena itu, bagian lain pada tahap pertama kegiatan penelitian ini adalah menentukan dan mengevaluasi nilai modulus elastisitas awal yang digunakan. Penentuan nilai modulus elastisitas awal ini bersifat *trial and error*. Setiap kali modulus elastisitas awal ditentukan, harus dilakukan evaluasi dengan menjalankan program EVERCALC beberapa kali untuk memastikan bahwa nilai *error* yang diperoleh masih berada dalam batas toleransi.

Tahap kedua penelitian ini adalah melakukan analisis sensitivitas yang bertujuan untuk mengetahui sensitivitas program perhitungan balik EVERCALC yang telah dipersiapkan dan prosedur perhitungan balik dalam Pedoman Desain terhadap kesalahan (*error*) yang mungkin terjadi pada parameter-parameter masukannya, yang umumnya rawan terhadap kesalahan, terutama kesalahan akibat pengukuran. Prosedur perhitungan balik dalam Pedoman Desain adalah dengan menghitung nilai M_r atau E_s atau E_2 dan E_p atau E_1 menggunakan persamaan-persamaan:

$$M_r = \frac{0,24P}{d_r r} \quad (1)$$

$$d_0 = 1,5pa \left\{ \frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left(\frac{D^3 \sqrt{E_p}}{a \sqrt{M_r}} \right)}} + \frac{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right)}{E_p} \right\} \quad (2)$$

Nilai E_p (atau E_1) dan M_r (atau E_2) baru dapat diterima apabila nilai E_p dan M_r memenuhi dua persyaratan berikut:

$$r > 0,7 a_e \quad (3)$$

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left\{ D \left(\frac{E_p}{M_r} \right)^{1/3} \right\}^2} \quad (4)$$

Terdapat tiga parameter yang akan digunakan untuk menguji sensitivitas program, yaitu parameter modulus elastisitas, beban, dan tebal komposit. Kesalahan yang dimasukkan ke dalam setiap parameter adalah penambahan faktor kesalahan (berupa angka random) terhadap satu set nilai lendutan yang diperoleh dari masukan data nilai modulus awal, beban, dan tebal lapisan tertentu. Nilai lendutan dengan faktor kesalahan akan berbentuk persamaan (Pronk, 1988):

$$d_m = d_t + 0,02d_t \frac{(r_1-0,5)r_2}{|r_1-0,5|} + 2 \frac{(r_3-0,5)r_4}{|r_3-0,5|} \quad (5)$$

dengan:

d_t = data lendutan yang sebenarnya (μm);

$r_1 - r_4$ = angka random dari 0-1.

Kesalahan yang dibangkitkan oleh Persamaan (1) dibatasi agar mempunyai nilai dalam rentang $\pm 2\%$ dari nilai d_t untuk mensimulasikan besarnya kesalahan pengukuran yang umumnya dihasilkan oleh alat FWD (Irwin et al, 1989). Selanjutnya deviasi nilai modulus elastisitas yang diperoleh berdasarkan nilai masukan yang mendapat penambahan faktor kesalahan terhadap nilai modulus awal akan ditentukan.

Pada tahap ketiga validasi terhadap program EVERCALC dan Pedoman Desain dilakukan dengan melakukan perbandingan antara modulus elastisitas hasil perhitungan balik berdasarkan data lendutan ukur (atau E hitung) dan modulus elastisitas berdasarkan hasil pengujian secara langsung (atau E ukur). Nilai lendutan dan modulus elastisitas hasil pengujian diperoleh dengan menggunakan data dari database Long Term Pavement Performance (LTPP), yaitu salah satu program Federal Highway Administration (FHWA)

dengan tujuan untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang dari perkerasan jalan terhadap pengaruh beban dan lingkungan di wilayah Amerika Serikat dan Kanada (Elkins et al, 2003). Penggunaan data LTPP pada penelitian ini karena data yang dibutuhkan oleh program perhitungan balik *best fit trial and error* (seperti program EVERCALC) tidak bersifat kewilayahan tetapi universal.

Tahap akhir penelitian ini adalah mengevaluasi Pedoman Desain. Pada tahap keempat ini rekomendasi mengenai penyempurnaan program perhitungan balik yang digunakan dalam Pedoman Desain akan diberikan.

HASIL DAN ANALISIS

Setting Program EVERCALC

Program perhitungan balik EVERCALC memerlukan 2 jenis masukan data. Yang pertama adalah data umum, yang terdiri atas radius pelat beban (a), jarak sensor dari pusat beban (r), rasio Poisson (μ), seed modulus (E), jumlah iterasi, dan batas toleransi terhadap error (ϵ). Kecuali tiga masukan data terakhir (μ , E , dan ϵ), masukan data yang lain umumnya berupa nilai default, yaitu $a = 5,91$ inch, $\mu = 0,5$ (dianggap sama untuk seluruh lapisan), dan nilai $r = 0, 8, 12, 18, 24, 36, 60$ inch dari pusat beban. Sedangkan data jumlah iterasi, batas toleransi terhadap error, serta modulus awal harus dilakukan secara *trial and error* untuk memastikan bahwa program perhitungan balik dapat berjalan sesuai ekspektasi. Dari beberapa kali *trial and error*, diperoleh nilai modulus awal adalah E_1 (atau E_p atau modulus komposit lapisan perkerasan di atas subgrade) sebesar 1000 ksi (dengan rentang modulus antara 100-5000 ksi). Sedangkan E_2 (atau modulus elastisitas tanah dasar atau M_r) sebesar 45 ksi (dengan rentang modulus antara 1-100 ksi). Iterasi maksimum adalah 1000 kali dengan batas toleransi untuk *error* pada lendutan adalah 0,001% dan batas toleransi untuk *error* pada nilai modulusnya adalah 0,001%.

Jenis masukan data kedua adalah data lendutan. Pada masukan data ini terdapat 3 jenis data, yaitu tebal lapisan (D), besarnya beban (P), dan besarnya lendutan (d_1 - d_7). Semua nilai masukan data ini diperoleh dari pangkalan data LTPP.

Analisis Sensitivitas terhadap Program EVERCALC dan Prosedur Perhitungan Balik dalam Pedoman Desain

Untuk analisis sensitivitas 5 set masukan data dipilih dengan memvariasikan nilai modulus elastisitas E_1 atau E_2 , besaran beban P , dan tebal komposit D . Dengan kombinasi data properti lapisan perkerasan tersebut besarnya lendutan d_1 sampai dengan d_7 adalah seperti yang terlihat pada kolom terakhir Tabel 1. Berdasarkan nilai lendutan dan properti perkerasan lainnya yang ada pada Tabel 1 dapat dicari nilai modulus elastisitas lapisan menggunakan program perhitungan balik EVERCALC dan prosedur perhitungan balik dalam Pedoman Desain (lihat Tabel 2 dan Tabel 3).

Tabel 1 Data Set yang Digunakan untuk Menentukan Validitas Modulus Awal

Data Set Ke-	Beban (P), lbs.	Tebal Komposit (D), inch	E ₁ , ksi	E ₂ , ksi	Lendutan (d ₁ -d ₇), mils
1	15985	12	200	9	31,318; 26,134; 23,793; 20,805; 18,107; 13,647; 8,083
2	15985	12	100	9	41,615; 31,864; 27,880; 23,265; 19,432; 13,724; 7,696
3	15985	12	200	15	23,128; 18,171; 16,087; 13,604; 11,492; 8,253; 4,678
4	11241	12	200	9	22,024; 18,378; 16,732; 14,630; 12,733; 9,597; 5,684
5	15985	20	200	9	21,534; 17,351; 16,026; 14,718; 13,581; 11,511; 8,189

Tabel 2 Nilai Modulus Elastisitas Hitung oleh Program EVERCALC dan Deviasinya terhadap Modulus Elastisitas Asli

Data Set Ke-	Nilai Modulus Elastisitas Awal		Nilai Modulus Elastisitas Hitung *)		Deviasi **)	
	E ₁ , ksi	E ₂ , ksi	E ₁ , ksi	E ₂ , ksi	E ₁ , %	E ₂ , %
1	200	9	200,01	9,00	0,00	0,00
2	100	9	100,03	9,00	-0,03	0,00
3	200	15	200,00	15,00	0,00	0,00
4	200	9	200,00	9,00	0,00	0,00
5	200	9	200,23	8,98	-0,11	0,22

Keterangan: *) nilai modulus elastisitas yang dihasilkan program EVERCALC

**) deviasi antara nilai modulus elastisitas awal dan nilai modulus elastisitas hitung

Tabel 3 Nilai Modulus Elastisitas Hitung yang Dihasilkan oleh Pedoman Desain dan Deviasi antara Nilai Modulus Elastisitas Asli dan Nilai Modulus Elastisitas Hitung (r = 60 inch)

Data Set Ke-	Nilai Modulus Elastisitas Awal		Nilai Modulus Elastisitas Hitung *)		Deviasi **)	
	E ₁ , ksi	E ₂ , ksi	E ₁ , ksi	E ₂ , ksi	E ₁ , %	E ₂ , %
1	200	9	189,20	7,91	5,40	12,11
2	100	9	90,80	8,31	-10,13	7,69
3	200	15	183,00	13,67	8,50	8,88
4	200	9	189,20	7,91	5,40	12,10
5	200	9	192,10	7,81	3,95	13,24

Keterangan: *) nilai modulus elastisitas yang dihasilkan Pedoman Desain

**) deviasi antara nilai modulus elastisitas awal dan nilai modulus elastisitas hitung

Pada Tabel 2 terlihat bahwa nilai deviasi antara nilai modulus elastisitas awal dan nilai modulus elastisitas hitung sangat rendah (kurang dari 1%). Untuk dapat menilai akurasi nilai modulus elastisitas hitung yang dihasilkan oleh program EVERCALC, nilai modulus elastisitas ini dibandingkan dengan hasil perhitungan modulus elastisitas dalam

Pedoman Desain, dengan menggunakan lendutan yang dihasilkan oleh sensor berjarak $r = 60$ inch dari pusat beban P (lihat Tabel 3). Pada kedua tabel tersebut terlihat bahwa program EVERCALC lebih baik dalam memprediksi nilai modulus elastisitas komposit E_1 dan modulus elastisitas tanah dasar E_2 dibandingkan dengan perhitungan balik pada Pedoman Desain.

Untuk menganalisis sensitivitas kedua metode perhitungan balik, data lendutan pada Tabel 1 divariasi besarnya dengan menambahkan bilangan random ke dalam setiap nilai lendutan mengikuti Persamaan (5). Setiap satu data set lendutan divariasi dengan 5 set bilangan random, sehingga secara keseluruhan dihasilkan 25 data lendutan yang mengandung kesalahan. Besarnya kesalahan maksimum yang ditambahkan pada setiap data lendutan adalah $\pm 2\%$. Hasil perhitungan balik dari kedua metode disajikan pada Tabel 4.

Terlihat bahwa deviasi rata-rata yang dihasilkan oleh program EVERCALC adalah 1,15%-3,31% (untuk E_1) dan 0,45%-1,31% (untuk E_2). Sedangkan deviasi rata-rata yang dihasilkan oleh Pedoman Desain adalah 2,02%-7,99% (untuk E_1) dan 8,08%-14,18% (untuk E_2). Nilai deviasi E_2 yang lebih kecil daripada nilai deviasi untuk E_1 pada program EVERCALC menunjukkan bahwa program EVERCALC mempunyai kemampuan menghitung modulus elastisitas pada lapisan terbawah lebih baik dibandingkan dengan menghitung modulus elastisitas pada lapisan-lapisan di atasnya. Modulus elastisitas lapisan terbawah, yang telah diperoleh dengan *error* yang kecil, akan digunakan sebagai *fixed modulus* untuk menghitung nilai modulus elastisitas pada lapisan di atasnya, demikian seterusnya sampai dengan modulus elastisitas lapisan teratas diperoleh.

Hal sebaliknya ditunjukkan oleh nilai deviasi rata-rata yang dihasilkan oleh Pedoman Desain. *Error* yang dihasilkan oleh nilai E_2 selalu lebih besar dibandingkan dengan *error* yang dihasilkan oleh nilai E_1 . Hal ini dapat disebabkan oleh penggunaan Persamaan (1) dan (4) pada metode ini. Penggunaan konstanta 0,24 pada Persamaan (1) menunjukkan bahwa persamaan ini merupakan persamaan empiris sehingga penggunaannya rentan terhadap *data transferability issue* antarlokasi. Persamaan (4) secara tidak langsung menunjukkan korelasi antara nilai lendutan d_0 dan d_r (yang merupakan komponen M_r atau E_2). Korelasi ini tidak mencerminkan respons struktur perkerasan jalan, yang dinyatakan dalam bentuk kurva lendutan. Oleh karena itu, nilai E_p atau E_1 yang diperoleh dari Persamaan (4) ini tidak bisa digunakan secara absolut sebagai nilai E_1 yang benar, namun hanya berperan sebagai indikasi atau perkiraan saja mengenai besarnya nilai E_p atau E_1 apabila dibandingkan dengan nilai M_r atau E_2 .

Tabel 4 Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas yang Dihasilkan oleh Kedua Metode Perhitungan Balik

Nilai Properti yang Digunakan	Program EVERCALC						Perhitungan Balik dengan Pedoman Desain Pd T-1-2002-B					
	Nilai modulus elastisitas hitung (ksi)		Deviasi modulus elastisitas (%)		Deviasi modulus elastisitas rata-rata (%)		Nilai modulus elastisitas hitung (ksi)		Deviasi modulus elastisitas (%)		Deviasi modulus elastisitas rata-rata (%)	
	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2
$E_1 = 200 \text{ ksi}, E_2 = 9 \text{ ksi}, D = 12 \text{ in.}, P = 15985 \text{ lb}$	193.71	8.96	3.25	0.45			183.02	7.98	8.49	11.366		
	202.08	9.05	-1.03	-0.55			192.35	7.87	3.83	12.560		
	209.91	8.97	-4.72	0.33	2.08	0.73	196.50	7.82	1.75	13.119	4.42	12.17
	202.40	9.15	-1.19	-1.64			191.41	8.04	4.30	10.617		
	199.59	8.94	0.21	0.67			192.52	7.81	3.74	13.202		
$E_1 = 100 \text{ ksi}, E_2 = 9 \text{ ksi}, D = 12 \text{ in.}, P = 15985 \text{ lb}$	100.00	9.10	0.00	-1.10			90.51	8.29	9.49	7.851		
	105.97	9.00	-5.63	0.00			95.14	8.22	4.86	8.694		
	100.00	9.01	0.00	-0.11	1.15	0.56	93.86	8.28	6.14	7.985	7.54	8.08
	100.00	8.87	0.00	1.47			89.41	8.21	10.59	8.800		
	100.13	9.01	-0.13	-0.11			93.37	8.36	6.63	7.091		
$E_1 = 200 \text{ ksi}, E_2 = 15 \text{ ksi}, D = 12 \text{ in.}, P = 15985 \text{ lb}$	202.74	15.10	-1.35	-0.66			183.73	13.93	8.14	7.143		
	201.63	15.12	-0.81	-0.79			182.70	13.77	8.65	8.191		
	192.66	14.91	3.81	0.60	2.62	0.65	177.30	13.71	11.35	8.594	7.99	8.71
	204.41	14.85	-2.16	1.01			185.53	13.61	7.24	9.263		
	210.46	14.97	-4.97	0.20			190.85	13.44	4.58	10.374		
$E_1 = 200 \text{ ksi}, E_2 = 15 \text{ ksi}, D = 12 \text{ in.}, P = 11241 \text{ lb}$	197.61	8.95	1.21	0.56			181.29	7.90	9.36	12.252		
	208.20	9.04	-3.94	-0.44			198.74	7.81	0.63	13.244		
	210.32	8.94	-4.91	0.67	3.31	0.45	195.52	7.95	2.24	11.682	3.75	12.39
	205.70	9.01	-2.77	-0.11			191.74	7.87	4.13	12.528		
	207.73	8.96	-3.72	0.45			195.23	7.90	2.39	12.267		
$E_1 = 200 \text{ ksi}, E_2 = 9 \text{ ksi}, D = 20 \text{ in.}, P = 15985 \text{ lb}$	200.15	8.85	-0.07	1.69			193.13	7.67	3.44	14.774		
	200.89	8.84	-0.44	1.81			192.53	7.70	3.74	14.478		
	206.26	8.95	-3.04	0.56	2.43	1.31	197.43	7.76	1.29	13.786	2.02	14.18
	209.24	8.89	-4.42	1.24			202.00	7.74	-1.00	13.983		
	208.78	8.89	-4.21	1.24			198.71	7.75	0.65	13.865		

Perhitungan Balik dengan Menggunakan Data LTPP

Untuk memenuhi kebutuhan data lapangan, baik dalam bentuk data lendutan maupun data modulus elastisitas, pada penelitian ini digunakan data LTPP dari lima lokasi uji, yaitu lokasi-lokasi A, B, C, D, dan E yang masing-masing merepresentasikan lokasi uji wilayah Negara Bagian Alabama, Colorado, Mississippi, South Dakota, dan Utah. Setiap lokasi mempunyai jenis tanah yang berbeda. Berdasarkan klasifikasi AASHTO, jenis tanah kohesif dapat ditemui pada lokasi B dan lokasi D, sedangkan di lokasi yang lain teridentifikasi mempunyai jenis tanah nonkohesif. Dari hasil pengujian di laboratorium diperoleh bahwa tanah kohesif mempunyai nilai modulus yang relatif lebih besar dibandingkan dengan tanah nonkohesif.

Tabel 5 Hasil Perhitungan Balik Menggunakan Program EVERCALC dari Nilai Lendutan yang Diperoleh dari Pangkalan Data LTPP

No.	Lokasi Pengambilan Data dan Jenis Tanah	Modulus Elastisitas E_1 Hitung (ksi)	Modulus Elastisitas E_2 Hitung (ksi)	Rata-rata Modulus Elastisitas Hitung E_2 (ksi)	Modulus Elastisitas Ukur E_2 (ksi)	Rata-rata Modulus Elastisitas E_2 Ukur (ksi)	Deviasi (%)
1	A (A-2-4)	57,84	17,38	17,99	14,1	14,14	27,24
		58,09	17,39		12,8		
		57,53	17,71		14,9		
		57,47	17,57		14,1		
		51,42	19,91		14,8		
2	B (A-6)	101,58	19,46	20,59	20,4	19,32	6,57
		82,51	19,05		18,7		
		98,57	19,25		18,1		
		186,42	22,54		19,4		
		196,09	21,73		19,1		
3	C (A-4)	68,66	21,49	15,92	20,2	13,02	22,28
		189,88	17,13		13		
		155,42	15,72		14,8		
		159,96	15,21		12,3		
		156,40	15,63		12,8		
4	D (A-6)	160,32	15,26	19,77	12,2	19,00	4,07
		203,95	16,55		13		
		1751,07	16,93		21,50		
		1359,77	20,87		16,20		
		1374,22	20,75		19,00		
5	E A-3	2672,12	20,01	11,55	17,30	9,30	24,17
		2658,21	19,57		21,00		
		1670,54	20,51		20,70		
		100,00	10,55		10,30		
		119,00	11,54		10,00		
		106,91	11,90		8,30		
		128,37	11,88		8,80		
		130,01	11,87		9,10		

Di setiap lokasi tersebut data lendutan di beberapa titik uji diukur dan total tebal lapisan di atas *subgrade* pada struktur perkerasan tempat lendutan tersebut diukur diperoleh secara sekunder. Data lendutan yang diambil untuk keperluan penelitian ini adalah data lendutan yang diperoleh berdasarkan beban terbesar dengan nilai yang bervariasi, yaitu antara 15105 lbs-17324 lbs.

Tabel 6 Hasil Perhitungan Balik Menggunakan Pedoman Desain dari Nilai Lendutan yang Diperoleh dari Pangkalan Data LTPP

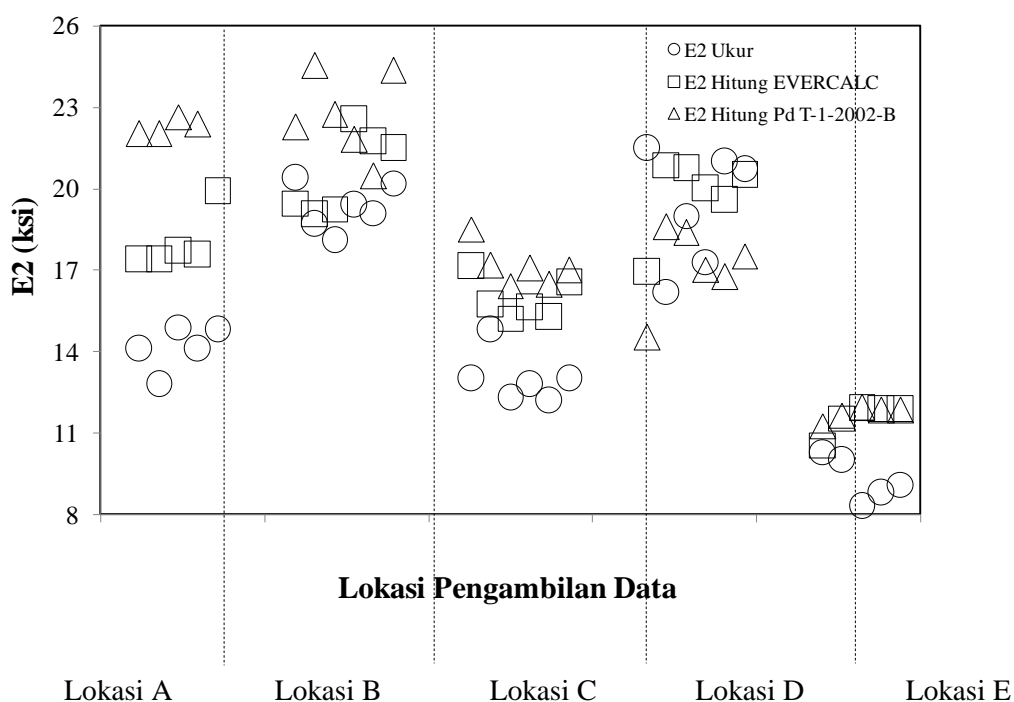
No.	Lokasi Pengambilan Data dan Jenis Tanah	Modulus Elastisitas E_1 Hitung (ksi)	Modulus Elastisitas E_2 Hitung (ksi)	Rata-rata Modulus Elastisitas Hitung E_2 (ksi)	Modulus Elastisitas Ukur E_2 (ksi)	Rata-rata Modulus Elastisitas E_2 Ukur (ksi)	Deviasi (%)
1	A (A-2-4)	55,94	22,02	23,20	14,1	14,14	64,09
		56,16	22,02		12,8		
		55,59	22,64		14,9		
		55,61	22,37		14,1		
		49,9	26,95		14,8		
2	B (A-6)	101,21	22,27	22,69	20,4	19,32	17,48
		79,05	24,52		18,7		
		97,86	22,73		18,1		
		195,7	21,82		19,4		
		202,65	20,46		19,1		
3	C (A-4)	71.79	24.35	17,10	20.2	13,02	31,39
		187,5	18,50		13		
		154,71	17,17		14,8		
		158,58	16,41		12,3		
		155,53	17,07		12,8		
4	D (A-6)	159,05	16,46	17,13	12,2	19,00	-9,85
		199.29	17.01		13		
		1338	14,52		21,5		
		1200	18,59		16,2		
		1211,3	18,39		19		
5	E A-3	1849,1	17,02	11,70	17,3	9,30	25,76
		2104	16,75		21		
		1223	17.51		20.7		
		106,49	11,25		10,3		
		125,05	11,64		10		
		113,81	11,94		8,3		
		117,38	11,83		8,8		
		119,42	11,83		9,1		

Data lendutan dan tebal perkerasan jalan di atas subgrade (lihat Tabel 1) digunakan sebagai masukan untuk perhitungan balik. Perhitungan balik menggunakan program EVERCALC, dengan asumsi nilai modulus awal, rentang modulus awal, dan rasio Poisson untuk lapisan 1 adalah 1000 ksi, 30 ksi-5000 ksi, dan 0,35. Sedangkan untuk lapisan 2 adalah 45 ksi, 1 ksi-100 ksi, dan 0,5. Nilai modulus awal yang digunakan pada perhitungan ini berbeda dengan nilai modulus awal pada tahap analisis sensitivitas (yaitu 100 ksi). Hal ini dikarenakan pada saat perhitungan balik menggunakan data lapangan ditemukan nilai E_1 hitung yang lebih kecil daripada nilai minimum modulus awal, yaitu 100 ksi. Untuk

perhitungan dengan menggunakan Pedoman Desain, nilai lendutan yang digunakan adalah lendutan d_7 dari sensor terakhir, yaitu $r = 60$ inch.

Hasil perhitungan balik tersebut disajikan pada Tabel 5 dan 6, masing-masing untuk perhitungan balik menggunakan program EVERCALC dan Pedoman Desain. Pada Tabel 5 terlihat bahwa terdapat deviasi yang bervariasi sebesar 4,07%-27,24% atau rata-rata sebesar 16,87% antara nilai E_2 ukur dan E_2 hitung. Sedangkan deviasi yang diperoleh antara nilai E_2 Ukur dan E_2 Hitung yang dihasilkan oleh Pedoman Desain (lihat Tabel 6) bervariasi antara 9,85%-64,09% atau rata-rata sebesar 29,71%. Terlihat bahwa deviasi yang dihasilkan oleh Pedoman Desain dua kali lebih besar daripada deviasi yang dihasilkan oleh program EVERCALC.

Selisih yang relatif besar antara nilai E_2 hitung yang dihasilkan oleh kedua metode perhitungan balik dan nilai E_2 ukur dapat disebabkan oleh waktu pengambilan data yang tidak sama antara pengukuran lendutan dan pengambilan sampel tanah untuk pengujian modulus elastisitas di laboratorium. Selisih waktu yang terjadi adalah antara 2-3 tahun, namun pemilihan yang cermat telah dilakukan dengan mengambil waktu pengujian pada musim yang sama.

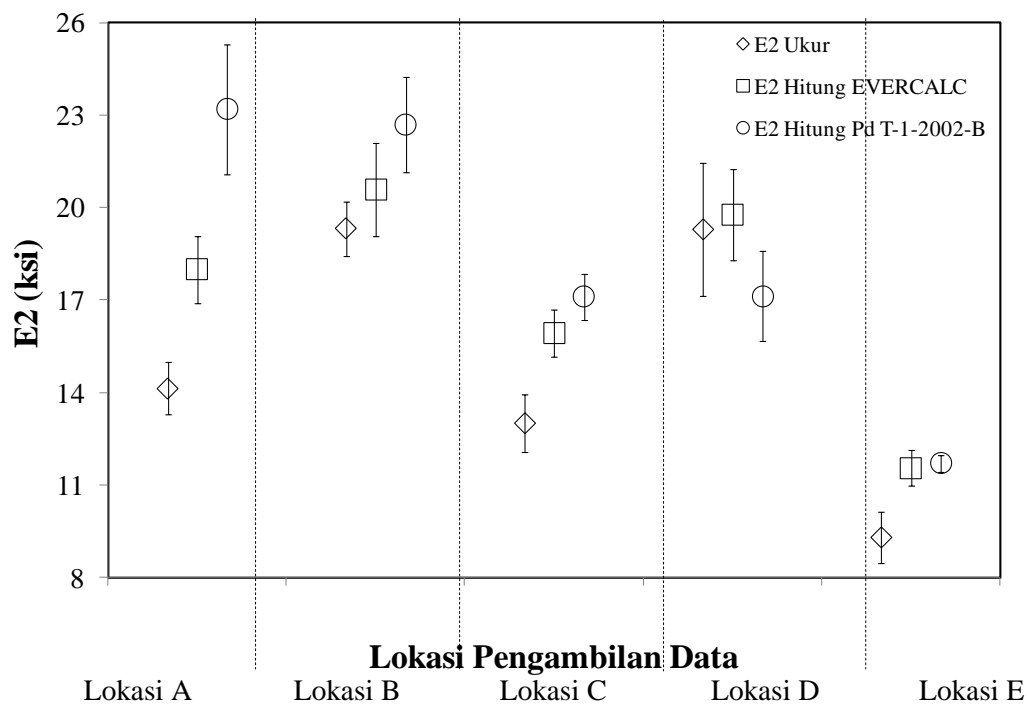


Gambar 2 Sebaran Nilai E_2 Hitung terhadap Nilai E_2 Ukur

Gambar 2 menyajikan sebaran masing-masing nilai E_2 hitung hasil perhitungan balik. Pada gambar ini terlihat bahwa pada lokasi-lokasi A, B, C, dan E, nilai E_2 hitung *over-estimate* nilai E_2 ukur. Sedangkan lokasi D merupakan satu-satunya lokasi dengan nilai E_2 hitung yang *under-estimate* nilai E_2 ukur. Gambar 2 juga memperlihatkan bahwa Pedoman Desain selalu menghasilkan *error* nilai E_2 yang lebih besar (baik pada kondisi

over atau *under-estimation*) dibandingkan dengan *error* nilai E_2 hitung dari program EVERCALC, walaupun pada lokasi E selisih *error* antara kedua metode tersebut bersifat marjinal.

Nilai rata-rata dan deviasi standar yang dihasilkan oleh nilai E_2 hitung di setiap lokasi (Gambar 3) berselisih cukup banyak. Namun bila dilihat deviasi standar nilai E_2 hitung di antara kedua metode tersebut dapat dinyatakan bahwa sebenarnya kedua metode tersebut tidak memberikan perbedaan yang besar. Deviasi standar nilai E_2 hitung yang dihasilkan oleh program EVERCALC memang lebih baik pada lokasi A dibandingkan dengan deviasi standar nilai E_2 hitung yang dihasilkan oleh Pedoman Desain, tetapi hal sebaliknya dapat ditemui pada lokasi E.



Gambar 3 Perbandingan Nilai Rata-rata dan Devisasi Standar Nilai E_2 Hitung terhadap Nilai E_2 Ukur

Terlihat bahwa program perhitungan balik menggunakan *algoritma best fit trial and error* relatif lebih baik dibandingkan dengan metode perhitungan balik menggunakan Pedoman Desain, karena menghasilkan nilai modulus yang lebih mendekati nilai E_2 ukur. Pada Tabel 5 dan Tabel 6 terlihat bahwa kedua metode perhitungan balik mampu memprediksi nilai E_2 ukur lebih baik dibandingkan dengan apabila kedua metode tersebut memprediksi nilai E_2 ukur tanah non-koheisif. Nilai E_2 atau M_r yang dihasilkan dari hasil perhitungan balik kedua metode tersebut cukup akurat untuk menentukan nilai modulus lapisan yang lain atau untuk menentukan keperluan analisis desain.

Pedoman Desain Ditjen Bina Marga menyebutkan bahwa nilai modulus tanah dasar yang diperoleh dari hasil perhitungan balik harus dikalikan dengan suatu faktor koreksi C,

dengan nilai C adalah 0,33, terutama untuk perkerasan jalan dengan jenis tanah kohesif. Berdasarkan hal ini nilai E_2 ukur tanah kohesif yang telah diperoleh dari hasil perhitungan balik akan dikalikan dengan faktor koreksi C sebesar 0,33. Adanya faktor koreksi ini menimbulkan pertanyaan apakah: (i) rasio maksimum nilai E_2 ukur terhadap nilai E_2 hitung dengan Pedoman Desain harus sebesar 0,33, atau (ii) semua nilai E_2 hitung dengan Pedoman Desain harus selalu dikalikan dengan faktor koreksi C maksimum 0,33 untuk mendapatkan nilai E_2 hitung yang sesuai untuk kebutuhan desain. Pertanyaan (i) dicoba dijawab dengan menganalisis Tabel 6. Dari tabel tersebut didapat bahwa rasio antara E_2 ukur terhadap E_2 hitung dengan Pedoman Desain adalah antara 0,61-1,11. Nilai rasio ini masih jauh dibandingkan dengan faktor koreksi C menurut AASHTO (1993). Sedangkan untuk pertanyaan (ii), mengalikan semua nilai E_2 hitung dari perhitungan balik menggunakan Pedoman Desain akan menyebabkan nilai E_2 hitung untuk desain pada tanah kohesif akan menjadi sangat kecil, yaitu kurang lebih 6 ksi-7 ksi. Nilai E_2 hitung untuk desain akan lebih kecil lagi apabila faktor koreksi C yang diambil lebih kecil daripada 0,33, yang bila digunakan untuk merancang tebal perkerasan jalan akan menghasilkan struktur perkerasan jalan yang sangat tebal dan tidak realistis.

Ada 2 hal yang perlu diperbaiki dalam Pedoman Desain, yaitu: (i) metode perhitungan balik dengan menggunakan data lendutan untuk menghitung nilai modulus elastisitas material sebaiknya diganti dengan program perhitungan balik, dan (ii) penggunaan faktor koreksi C dalam Pedoman Desain sebaiknya dihilangkan.

KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Hasil analisis sensitivitas terhadap program EVERCALC menunjukkan bahwa program EVERCALC konsisten dalam memprediksi nilai modulus (dengan deviasi terhadap kurang dari 5%), meskipun nilai lendutan yang digunakan dalam program perhitungan balik ini mempunyai kesalahan. Hal berbeda dijumpai pada prosedur perhitungan balik dalam Pedoman Desain yang mempunyai deviasi terhadap nilai modulus awal yang besar, yaitu maksimum 15%.
- 2) Untuk dapat mengevaluasi nilai modulus elastisitas yang dihasilkan oleh kedua metode perhitungan balik tersebut, data lendutan hasil pengukuran lapangan dan data modulus elastisitas hasil pengujian diekstraksi dari pangkalan data *Long Term Pavement Performance*. Dari hasil perhitungan balik menggunakan data riil tersebut diperoleh hasil bahwa nilai modulus elastisitas tanah dasar kohesif rata-rata lebih tinggi dari nilai modulus elastisitas tanah dasar nonkohesif. Begitu pula akurasi kedua metode perhitungan balik rata-rata lebih baik apabila digunakan untuk menghitung nilai modulus elastisitas tanah dasar kohesif. Secara keseluruhan program EVERCALC

dapat memprediksi nilai modulus elastisitas ukur lebih baik dibandingkan dengan Pedoman Desain Pd T-1-2002-B.

- 3) Persyaratan Pedoman Desain untuk menggunakan faktor koreksi C maksimum sebesar 0,33 terhadap nilai E_2 dari perhitungan balik pada saat desain tidak terbukti pada penelitian ini. Dari hasil perhitungan rasio modulus elastisitas E_2 ukur terhadap nilai E_2 hitung dengan Pedoman Desain diperoleh nilai rasio sebesar 0,61-1,11, yang jauh lebih besar dibandingkan dengan syarat rasio maksimum 0,33. Oleh karena itu, diusulkan untuk perbaikan Pedoman Desain. Metode perhitungan balik dengan menggunakan data lendutan untuk menghitung nilai modulus elastisitas material sebaiknya diganti dengan program perhitungan balik menggunakan algoritma *best fit trial and error* dan penggunaan faktor koreksi C dalam Pedoman Desain menjadi tidak diperlukan lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structure*. Washington, DC.
- Darter, M.I, Elliot, R., dan Hall, K.T. 1992. *Revision of AASHTO Pavement Overlay Design Procedures, Appendix Documentation of Design Procedures*. NCHRP Project 20-7/Task 39. Washington, DC.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2002. *Pedoman Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur, Pd T-1-2002-B*. Jakarta.
- Elkins, G.E., Schmalzer, P., Thompson, T., dan Simpson, A. 2003. *Long-Term Pavement Performance Information Management System-Pavement Performance Database User Guide*. FHWA Report No. FHWA-RD-03-088. Washington, DC.
- Irwin, L.H., Yang, W.S., dan Stubstand, R.N. 1989. *Deflection Reading Accuracy and Layer Thickness Accuracy in Backcalculation of Pavement Layer Moduli, Non-destructive Testing of Pavement and Backcalculation of Moduli*. ASTM STP 1026, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.
- Pronk, A.C. 1998. *Implementation Problems and Reliability of Falling Weight Deflectometer (FWD) Measurements on Three Layer Systems*. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologist, Williamsburg, VA.